

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

М.Я. Погребисский, А.И. Бодарев, Э.Ф. Сальманова, А.С. Булгаков

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия, [PogrebisskiyMY@mpei.ru](mailto:PogrebisskiyMY@mpei.ru)

*Аннотация – Проанализирован механизм износа нагревательных элементов вакуумных печей сопротивления, изготовленных из чистых металлов (вольфрам, молибден). Разработан и программно реализован алгоритм расчета срока службы таких нагревательных элементов при различных значениях температуры и остаточного давления в печи. Получены зависимости срока службы от диаметра (толщины) нагревателя, температуры и давления. Предложена система регулирования температуры высокотемпературной вакуумной печи по косвенному параметру сопротивления нагревателей с учетом их износа.*

*Ключевые слова – электропечь сопротивления, вакуум, нагреватели, износ, испарение, окисление, срок службы, математическая модель, регулирование температуры.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

Вакуумные электропечи сопротивления используются в машиностроении, химической технологии и других отраслях промышленности для проведения ряда технологических процессов (термообработка, спекание из порошков, в том числе тугоплавких металлов, обжиг керамики, получение карбидов, восстановление, рафинирование, исследование свойств материалов и др.). Нагревательные элементы среднетемпературных (рабочая температура 1200–1700°C) и высокотемпературных (1700–3000°C) вакуумных печей часто изготавливаются из тугоплавких металлов, в среднетемпературных печах в основном используется молибден или сплавы молибдена с вольфрамом (МВ-30 и другие), в высокотемпературных – вольфрам.

Прогнозирование срока службы нагревательных элементов важно как при проектировании печей сопротивления, так и при планировании их эксплуатации. В вакуумных печах при высоких температурах и высоком вакууме срок службы нагревателей определяется, прежде всего, испарением их материала, при сравнительно низких температурах и среднем и низком вакууме преобладает окисление остаточным кислородом с последующим испарением окислов. В литературе [1] приводятся эмпирические зависимости скорости массоуноса (за счет испарения и окисления с последующим испарением) тугоплавких металлов от температуры нагревателя и остаточного давления в камере, однако обоснованная методика,

позволяющая рассчитывать срок службы нагревателей разной формы и размеров в различных температурных условиях, до настоящего времени отсутствовала. Тем более для нагревателей из тугоплавких металлов, работающих в вакууме, отсутствовали удобные для использования в инженерной практике зависимости срока службы от величины сечения нагревателя и температуры, подобные тем, которые хорошо известны для нагревателей из сплавов сопротивления, работающих в воздушной среде [2, 3].

## II. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА НАГРЕВАТЕЛЯ

В литературных источниках [1] приведены зависимости скорости массоуноса материалов нагревателей (вольфрама и молибдена)  $Q$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), от температуры нагревателя (в диапазоне до 2800°C для вольфрама и до 2000°C для молибдена) и от давления в камере печи (в диапазоне от 10<sup>-5</sup> до 10<sup>-2</sup> Па). Однако этих зависимостей недостаточно для прогнозирования срока службы реального нагревателя.

Во-первых, по мере уноса материала нагревателя его поверхность уменьшается, удельная поверхностная мощность при неизменной потребляемой мощности увеличивается, что приводит к росту температуры нагревателя. Таким образом, температура нагревателя не остается неизменной при воспроизводимом технологическом процессе, то есть при неизменной температуре печи (внутреннего экрана теплоизоляции, вблизи которого наиболее часто устанавливается датчик обратной связи системы регулирования температуры) или нагреваемого изделия и при постоянстве потребляемой мощности. С ростом температуры нагревателя в ходе эксплуатации печи при прочих равных условиях увеличивается скорость массоуноса, что ведет к ускорению износа нагревателя.

Во-вторых, скорость массоуноса, кг/(м<sup>2</sup>·с), является величиной, отнесенной к площади поверхности, поэтому из-за уменьшения площади поверхности нагревателя при износе скорость уменьшения его сечения непостоянна даже при постоянной скорости массоуноса. В наибольшей степени этот эффект проявляется у нагревателей круглого (пруток, проволока) сечения.

Разработанная аналитическая модель процесса износа нагревателя учитывает такие факторы, как зависимость скорости массоуноса от температуры и остаточного давления в камере печи, рост удельной поверхностной мощности и, следовательно, температуры нагревателя при уменьшении его сечения, необходимости увеличения напряжения питания при уменьшении сечения для поддержания мощности и, следовательно, заданной температуры печи, зависимость удельного электрического сопротивления материала нагревателя от температуры.

Масса материала нагревателя круглого сечения, потерянная (за счет массоуноса) за время  $\Delta t$ , составляет

$$\Delta m = Q F_{\text{пов}} \Delta t \quad (1)$$

где  $Q$  – скорость массоуноса, определяемая по вышеуказанным литературным источникам в зависимости от температуры и давления,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$F_{\text{пов}}$  – площадь поверхности нагревателя, равная  $\pi d L$ , где  $d$  – диаметр нагревателя,  $L$  – его развернутая длина.

Объем унесенного материала

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\gamma} \quad (2)$$

где  $\gamma$  – плотность материала нагревателей.

Новый объем нагревателя

$$V^* = \frac{\pi d^2}{4} L - \Delta V \quad (3)$$

Новый диаметр нагревателя

$$d^* = \sqrt{\frac{4V^*}{\pi L}} \quad (4)$$

Температура нагревателя в работе определяется как

$$t_n = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{P}{C_{\text{пр}} F_{\text{пов}}}} + \left(\frac{T_n}{100}\right)^4 - 273, ^\circ\text{C} \quad (5)$$

где  $P$  – мощность, потребляемая нагревателем;

$T_n$  – абсолютная (в Кельвинах) температура печи (внутреннего экрана);

$C_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент теплообмена излучением, определяемый с учетом коэффициентов  $\alpha_{\text{эф}}$ ,  $\alpha_{\text{ш}}$ ,  $\alpha_{\text{с}}$ ,  $\alpha_{\text{р}}$ , отражающих конструкцию нагревателя, его шаг, приведенную степень черноты и соотношения размеров нагревателя и стенки [2].

Таким образом, рассчитываются диаметр нагревателя  $d^*$  и его температура  $t_n$  для текущего момента времени. Затем с учетом этих значений определяются скорость массоуноса, масса материала, унесенного за следующий интервал времени  $\Delta t$  (по ф. (1)), и рассчитываются диаметр нагревателя и его температура (по ф. (2)-(5)) для следующего момента времени, и так далее.

С уменьшением сечения нагревателя при его износе активное сопротивление нагревателя возрастает,

и, чтобы поддерживать мощность, выделяющуюся в нагревателе и, соответственно, температуру печи постоянной, регулятор температуры увеличивает напряжение, подаваемое на нагреватель. Напряжение можно рассчитать как

$$U = \sqrt{P \rho \frac{4L}{\pi (d^*)^2}} \quad (6)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала нагревателя, определяемое с учетом известной температурной зависимости.

Выражения, аналогичные (2)-(6), получены для нагревателей прямоугольного сечения (лента, пластина).

В дальнейшем при совершенствовании модели планируется обеспечить учет влияния газовой выделений элементов конструкции печи и нагреваемого изделия (загрузки) и паров масла в рабочем пространстве на износ нагревателя, а также адаптировать модель для нагревателей, работающих не в вакууме, а в различных защитных газах (аргоне и др.).

Разработанный на основе предложенной математической модели и программно реализованный алгоритм позволяет рассчитать текущие значения диаметра (или толщины) нагревателя, его температуры и потребного напряжения питания для любого момента времени эксплуатации.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА НАГРЕВАТЕЛЕЙ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С использованием предложенной математической модели выполнены расчеты срока службы нагревателей различной конфигурации при различных условиях (температура, давление).

Рис. 1а-г демонстрируют пример изменения температуры, диаметра, сопротивления нагревателя круглого сечения и потребного напряжения питания в зависимости от времени эксплуатации. При этом рассматривался нагреватель из молибдена начальным диаметром 6 мм, используемый в печи СНВН-3.4.3/11 (температура печи, то есть фактически внутреннего экрана,  $1100^\circ\text{C}$ ).

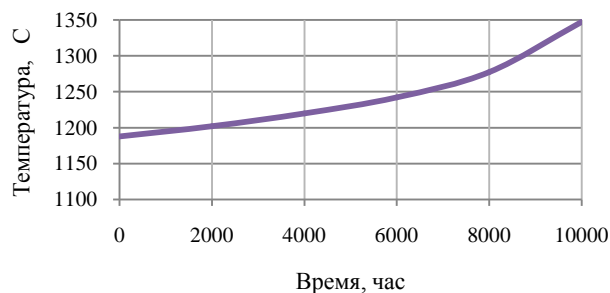
При анализе приведенных зависимостей необходимо учитывать, что на практике окончанием срока службы нагревателя следует считать момент, когда его сопротивление увеличилось (в связи с уменьшением сечения нагревателя) на 20-30% по сравнению с исходным значением, поскольку при дальнейшем росте сопротивления запаса по напряжению источника питания будет недостаточно для компенсации этого роста.

В отличие от нагревателей круглого сечения, у плоских нагревателей увеличение температуры нагревателя по мере износа при прочих равных условиях выражено незначительно.

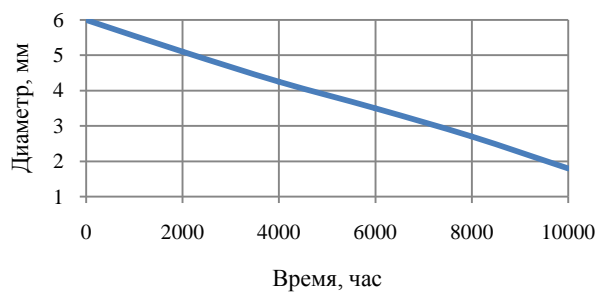
Практически полезными являются полученные расчетные зависимости срока службы нагревателей круглого и прямоугольного сечения из молибдена и вольфрама от начального диаметра (толщины), температуры печи и остаточного давления в камере. Так, при температуре  $1600^\circ\text{C}$  расчетный срок службы

нагревателя из молибденовой проволоки диаметром 6 мм при вакууме  $10^{-2}$  Па составляет около 300 часов,

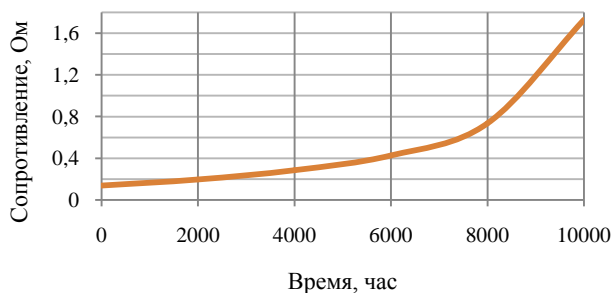
что согласуется с опытом эксплуатации печей. Примеры таких зависимостей представлены на рис. 2.



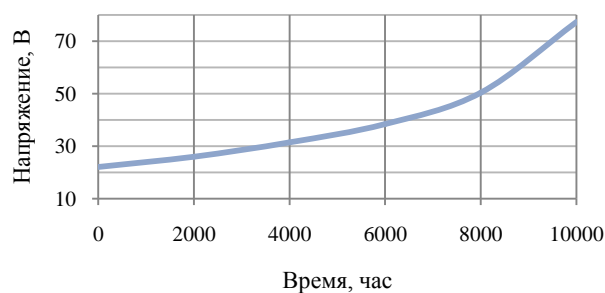
а



б

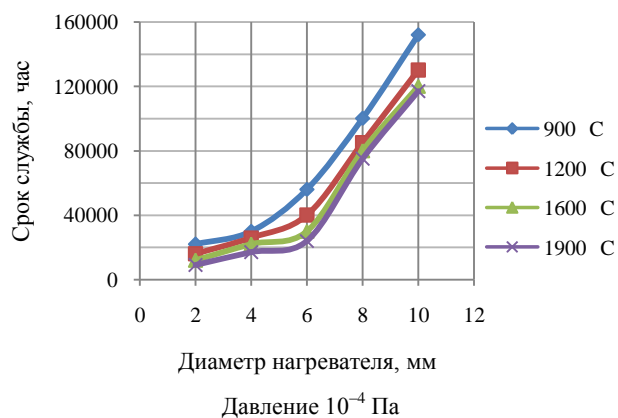
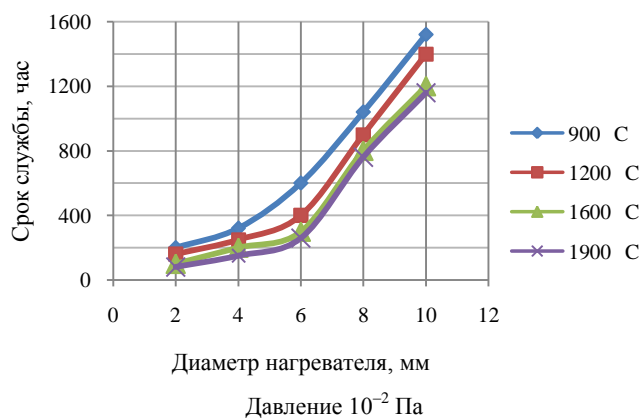


в

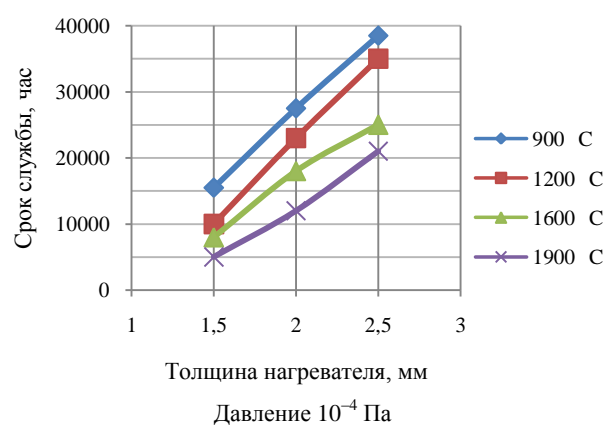
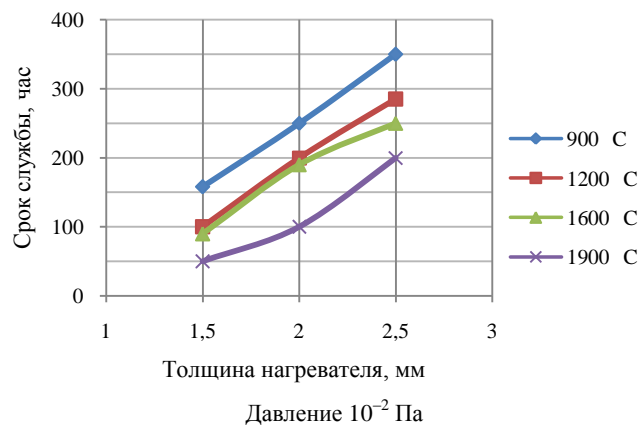


г

Рис. 1. Изменение температуры в работе (а), диаметра (б), сопротивления (в) и потребного напряжения питания в ходе эксплуатации нагревателя круглого сечения из молибдена начальным диаметром 6 мм при температуре печи  $1100^{\circ}\text{C}$ .



а



б

Рис. 2. Зависимости срока службы (до увеличения сопротивления на 30%) нагревателей из молибдена круглого (а) и прямоугольного (б) сечения от начального геометрического размера (диаметра или толщины) при различных температурах и давлениях в камере печи.

Сравнение расчетного срока службы нагревателей круглого и прямоугольного сечения показывает, что при прочих равных условиях (в печах с одинаковыми объемом рабочего пространства, температурой, давлением и мощностью) нагреватели круглого сечения служат существенно (в 2,5–3 раза) дольше.

#### IV. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕЧИ ПО КОСВЕННОМУ ПАРАМЕТРУ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЕЙ С ПОПРАВКОЙ НА ИХ ИЗНОС

При температурах свыше 1800°C, характерных для высокотемпературных вакуумных печей сопротивления, стойкость традиционных датчиков температуры (термопар) очень невелика. Использование в качестве датчиков температуры пирометров излучения в вакуумных печах с экранной теплоизоляцией практически неосуществимо из-за отсутствия прямой видимости рабочего пространства. Таким образом, в высокотемпературных вакуумных печах регулирование температуры приходится осуществлять по разомкнутому принципу, что негативно сказывается на точности регулирования.

Улучшить точность регулирования температуры в высокотемпературных печах позволит использование принципа регулирования по косвенному параметру сопротивления нагревателей. При этом температура рассчитывается по известной функциональной зависимости удельного электрического сопротивления материала нагревателя (вольфрама)  $\rho$  от температуры  $t$ . В свою очередь, удельное сопротивление определяется (на примере нагревателя круглого сечения) как

$$\rho = \frac{U_a}{I_a} \cdot \frac{\pi d^2}{4L} \quad (7)$$

где  $U_a, I_a$  – измеренные значения активных составляющих первых гармоник напряжения и тока.

Таким образом, для расчета удельного сопротивления необходимо знание сечения (диаметра или толщины) нагревателя, и уменьшение сечения вследствие износа в ходе эксплуатации нагревателя приводит к возникновению погрешности в определении удельного сопротивления и, следовательно, температуры.

Для улучшения точности определения температуры по косвенному параметру необходимо введение поправки на уменьшение сечения нагревателя в ходе эксплуатации. Такая поправка может рассчитываться на основании рассматриваемой математической модели.

Функциональная схема системы регулирования температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей представлена на рис. 3. Объектом управления является высокотемпературная вакуумная печь сопротивления 1, исполнительным устройством системы регулирования температуры традиционно служит тиристорный регулятор напряжения 2. Блок

определения удельного сопротивления 3 рассчитывает удельное сопротивление материала нагревателей на основании сигналов датчиков напряжения 4 и тока 5 с учетом поправки на износ нагревателей, рассчитываемой блоком введения поправки 7. Алгоритм расчета поправки блоком 7 строится на основании предложенной модели процессов износа нагревателей. Блок 7 определяет мгновенное значение скорости массового материала нагревателей в соответствии с температурой и давлением (датчик давления – поз. 6) и рассчитывает в реальном времени текущий диаметр (сечение) нагревателя, который учитывается блоком определения удельного сопротивления 3. Блок расчета температуры нагревателя 8 определяет текущее значение температуры в соответствии с известной зависимостью  $t(\rho)$ . Это значение температуры используется традиционным регулятором температуры (например, с ПИД-законом регулирования) 9 в качестве сигнала обратной связи, а также передается блоку введения поправки 7 для определения мгновенной скорости массового материала.

Дополнительно используя блок определения мощности 10 и блок расчета температуры печи 11, возможно пересчитать температуру нагревателя в температуру печи или загрузки на основании законов теплопередачи излучением, зная потребляемую мощность.

Отметим, что датчик тока, как правило, уже используется в существующих системах управления вакуумными печами с нагревателями из тугоплавких металлов в связи с необходимостью ограничения тока при прогреве нагревателя из холодного состояния.

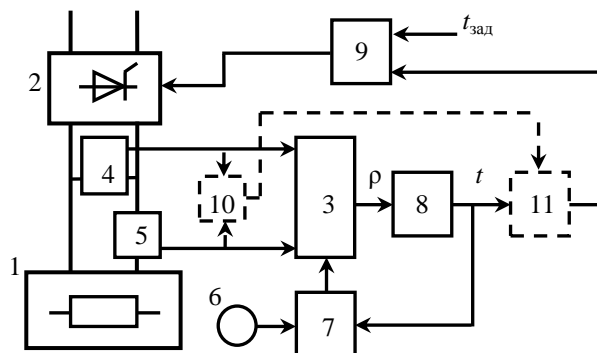


Рис. 3. Функциональная схема системы регулирования температуры по косвенному параметру сопротивления нагревателей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мармер, Э.Н. Материалы для высокотемпературных вакуумных установок. - М.: Физматлит, 2007. - 152 с.
- [2] Электротермическое оборудование: Справочник / А.П. Альтгаузен, Н.М. Некрасова, М.Б. Гутман; под общ. ред. А.П. Альтгаузена. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1980. - 416 с.
- [3] Жуков, Л.Л. Сплавы для нагревателей. / Л.Л. Жуков, И.М. Племянникова, М.Н. Миронова, Д.С. Баркая, Ю.В. Шумаков. - М.: Металлургия, 1985. - 146 с.